

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

PAR

SOPHIE BABIN-RATTÉ

ETUDE DE LA MODULATION DE LA FORCE DE PINCE LORS D'UNE TÂCHE
DE PRÉHENSION AVEC PERTURBATION DU POIDS DE L'OBJET ET LORS
D'UN MOUVEMENT OSCILLATOIRE DU BRAS

SEPTEMBRE 1996

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	I
REMERCIEMENTS.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	IV
LISTE DES FIGURES	V
CHAPITRES.....	1
I. INTRODUCTION	1
Mécanisme de contrôle anticipé.....	2
Problématique	7
Hypothèses.....	9
II. MÉTHODE	10
Sujets.....	10
Tâche.....	10
Appareillage.....	10
Procédures.....	13
Acquisition et analyses des données	14
Variables et analyses.....	15
III. RÉSULTATS.....	18
Déplacement vertical de l'objet	18
Condition statique	20
Condition dynamique.....	31

IV. DISCUSSION.....	42
Déplacement vertical.....	42
Condition statique	43
Condition dynamique.....	46
V. CONCLUSION.....	48
RÉFÉRENCES	49

RÉSUMÉ

Lors de nos activités quotidiennes, nous manipulons fréquemment des objets avec une pince de précision utilisant le pouce et l'index. Afin de prévenir les glissements, nous devons ajuster la force de pince aux caractéristiques de l'objet (Johansson, 1988, 1990; Smith, 1994). Flanagan, Tresilian et Wing (1993, 1995) ont étudié la coordination entre la force de pince et la tension réelle (calculée à partir de la masse de l'objet et de son accélération verticale en tenant compte du poids de l'objet) dans des mouvements dirigés dans les axes horizontal et vertical ainsi que dans des mouvements d'oscillation. Ces auteurs ont démontré que la force de pince est modulée en phase avec la tension réelle dans des mouvements oscillatoires qui impliquent des accélérations importantes de l'objet et dans des mouvements d'un point à l'autre. Par contre, l'augmentation de la fréquence d'oscillation entraîne une augmentation de la force de pince moyenne et une diminution de l'importance de la relation entre la force de pince et la tension (c'est-à-dire de la modulation parallèle).

L'augmentation de la fréquence d'oscillation à des valeurs extrêmes entraînent des variations de directions verticale très brusques. Ces nouvelles contraintes entraînent une modification dans les mécanismes d'adaptation de la force de pince. Le but de ce projet de recherche est de comparer l'ajustement de la pince lorsqu'une tension est induite par une force extérieure appliquée sur l'objet ou lorsqu'elle est émise par le sujet lui-même, ainsi la tension varie selon la vitesse à laquelle il exécute un mouvement. De plus, nous

désirons déterminer les limites d'adaptation de la force de pince, lors d'une augmentation brusque et rapide de la tension et de la vitesse appliquées à l'objet.

Un groupe de dix sujets masculins ont participé à cette étude. Les sujets devaient saisir un objet placé sur la table devant eux, et le soulever. Selon la tâche requise, ils devaient par la suite effectuer des mouvements cycliques verticaux ou bien maintenir l'objet dans une position fixe. Dans la condition statique, l'augmentation de la tension sur l'objet était générée en utilisant un élastique fixé à un engrenage qui permet de produire une augmentation de la force. L'objet était muni de jauges de contrainte pour mesurer la force de pince. Les données cinématiques ont été obtenues en utilisant le système d'analyse de mouvement optoélectronique de type WATSMART.

Les résultats de la condition statique montrent différents types de modulation utilisés par les sujets pour moduler leur force de pince en fonction des modifications de la tension réelle. Le sujet tente d'exercer un contrôle sur l'ajustement de sa force de pince pour chaque essai en fonction de sa connaissance des résultats et de son appréciation de la réussite de la tâche. Selon la vitesse d'application de la tension et la séquence des essais, les sujets privilégient un certain type de modulation. D'autre part, avec des fréquences d'oscillation très importantes en condition dynamique, le sujet augmente la force de pince à une valeur relativement stable. On constate également que l'augmentation de la fréquence d'oscillation entraîne un découplage temporel entre la force de pince et l'accélération.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le professeur Claude Dugas pour l'encadrement de ce projet de recherche. Je remercie également messieurs Denis Marchand et Claude Brouillette pour leur support tout au long de l'expérimentation.

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
1. Amplitude et durée de l'augmentation initiale de la Fp en fonction de la vitesse d'application de la Tr (pour la période de 0 à 600 ms).....	23
2. Amplitude et durée de la Fp en fonction de la vitesse d'application de la Tr (pour la période de 600 à 1,1 sec).....	24
3. Pourcentage des différents types de modulation en fonction de la vitesse d'application de la tension en condition lente, moyenne et rapide.....	26
4. Latence des glissements et de la réponse du réajustement de la Fp en millisecondes.....	27
5. Pourcentage d'utilisation des types de modulation selon l'ordre de présentation des essais.....	28
6. Pourcentage des différents types de pic retrouvés en fonction de la vitesse d'oscillation pour des plages d'oscillation de 0,05 c/s.....	36

LISTE DES FIGURES

Figures	Page
1. Schéma de l'appareillage	12
2. Déplacement vertical pour un sujet en fonction du temps pour les vitesses d'oscillation lente (A), moyenne (B) et rapide (C).	19
3. Augmentation initiale de la Fp pour les conditions lente (A), moyenne (B) et rapide (C).....	22
4. Différents types de modulation de la pince: A) modulation attendue, (B) glissement continu, C) glissements	25
5. Moyenne de la Fp de deux sujets pour les vitesses lente, moyenne et rapide	30
6. Mouvement oscillatoire d'un sujet type pour les vitesses lente (A), moyenne (B) et rapide (C).....	32
7. Force de pince moyenne en fonction des fréquences d'oscillation lente, moyenne et rapide.....	33
8. Ratio du gain de Fp/Tr pour les vitesses lente, moyenne et rapide.....	34
9. Modulation de la Fp en fonction de la Tr pour différentes fréquences de la condition rapide; A) 2,82 Hz, B) 4,82 Hz et C) 5,29Hz..	36
10. Latence entre la Fp et l'accélération lors d'un mouvement oscillatoire (A) lent, 1 Hz, (B) moyen 2 Hz et (C) rapide 5,25 Hz	39
11. Type de latence retrouvé en fonction des quatre groupes de fréquence d'oscillation.....	41

CHAPITRE I

Introduction et problématique

Une grande partie de notre héritage culturel provient de ce que nous créons avec nos mains. En effet, nous construisons des immeubles, fabriquons des outils, produisons des toiles et des sculptures, bref nous transformons notre environnement. Ces différents gestes ne pourraient s'accomplir sans la flexibilité, la dextérité et le contrôle précis de la force par la main (Rosenbaum, 1991).

Nos mains se distinguent également du point de vue de leur structure et au niveau du contrôle moteur. En raison de cette souplesse, les individus peuvent accomplir une multitude de manipulations en modifiant le type de prise qu'ils exercent sur les objets. Il nous est ainsi possible de manipuler une petite vis et une balle avec la même efficacité mécanique. Afin de manier les objets de manière stable, la main peut prendre une variété de postures. Par exemple, la pince que nous employons pour saisir et transporter un crayon, est différente de celle utilisée pour écrire. Cependant, des contraintes telles que les caractéristiques physiques de l'objet, les limites physiologiques du bras et de la main ainsi que le but de la tâche, restreignent les chances de succès de la posture choisie (Mackenzie et Iberall, 1994). De cette façon, les postures que la main adopte dépendent du poids, de la taille, de la forme, de la texture de l'objet ainsi que de l'agencement des différentes articulations entre elles.

De quelle façon le système nerveux central (SNC) peut-il contrôler nos mains?

Les nombreuses études dans le domaine de la programmation et du contrôle de la

motricité ont généré plusieurs modèles théoriques. Certains auteurs suggèrent que le feedback sensoriel joue un rôle fondamental dans le contrôle des mouvements (Adams, 1968). Par contre, une conception opposée suggère qu'une réponse motrice programmée s'exécute indépendamment de l'information sensorielle (Keele, 1968; Lashley, 1917). Récemment, un modèle hybride a fait l'objet de plusieurs recherches. Selon ce modèle, le contrôle moteur se réalise par une interaction entre une programmation centrale et l'intégration de l'information de diverses sources d'afférences (Abbs, Gracco et Cole, 1984; Proteau, Lassonde, et Chicoine, 1992). Ce modèle suggère qu'avec l'apprentissage, les sujets développent des mécanismes de contrôle (proacteurs) qui permettent d'anticiper les changements.

Dans le domaine de la préhension, il est nécessaire d'utiliser un mécanisme d'anticipation pour manipuler efficacement les objets. En ce sens, nous utilisons un mécanisme similaire au proacteur, soit le contrôle anticipé, qui nous permet d'ajuster nos commandes motrices aux caractéristiques physiques des objets.

Mécanisme de contrôle anticipé

Lors de nos activités quotidiennes, nous utilisons fréquemment une pince de précision, avec le pouce et l'index, pour saisir et déplacer les objets. Pour manipuler un objet, deux forces sont nécessaires soit la force de pince (F_p) pour saisir l'objet et la force de soulèvement (F_s) pour vaincre le poids de l'objet et la force gravitationnelle. Ces deux forces sont utilisées conjointement au cours de la manipulation. Afin de prévenir les glissements, nous devons ajuster la F_p et la F_s en fonction des caractéristiques de l'objet.

Cette adaptation se réalise dans un premier temps, sur la base d'une identification visuelle des propriétés physiques de l'objet qui permet d'estimer le poids de celui-ci (Gordon, Forssberg, Johansson et Westling, 1991a, b).

Johansson et Westling (1987) expriment la relation entre ces deux forces comme un ratio force de pince/force de soulèvement (F_p/F_s). Ce qui implique que durant l'exécution du mouvement, nous pouvons moduler ces forces en utilisant le ratio pour contrôler notre performance. Pour manipuler délicatement et avec succès les objets, le rapport F_p/F_s doit être constamment ajusté aux conditions de friction entre la peau et l'objet (Smith, 1994). Le sujet prévient les glissements en utilisant l'information sensorielle pour éviter les dommages potentiels faits à l'objet et la fatigue musculaire causée par une force de pince excessive.

Ce rapport excède toujours un seuil de glissement défini comme le ratio minimal pour tenir l'objet entre les doigts. La différence entre le rapport utilisé par le sujet et le seuil de glissement est considérée comme la marge de sécurité. Lors de la manipulation d'un objet, il arrive parfois que la marge de sécurité diminue et s'approche du seuil de glissement. Il se produit alors des microglissements perçus par les mécanorécepteurs de la peau en contact avec l'objet. Après un bref délai de correction réflexe d'environ 74 ms, le rapport F_p/F_s est augmenté, rétablissant ainsi une marge de sécurité suffisante. Ces microglissements servent de signaux d'alarme et permettent de manipuler plus efficacement les objets (Johansson et al., 1987).

Johansson et Westling (1990) ont également démontré l'existence d'un mécanisme de contrôle anticipé qui permet au système nerveux d'émettre les commandes motrices adéquates pour manier les objets avec précision. Lors d'une manipulation, le mécanisme de contrôle anticipé permet une programmation motrice basée sur des informations emmagasinées dans une mémoire sensori-motrice. Ces informations concernent les paramètres physiques de l'objet à manipuler, tels que les relations taille-poids et la rugosité apparente qui permettent d'établir un équilibre au niveau de la synergie musculaire concernée par l'action. Parallèlement à ce mécanisme, les différents récepteurs somato-sensoriels (mécanorécepteurs, propriocepteurs articulaires et musculaires) transmettent, tout au long de la manipulation, un message afférent au système nerveux.

Si la représentation en mémoire que l'on a de l'objet ne convient pas à la situation, par exemple la Fp est insuffisante pour soulever l'objet, ceci implique que les commandes motrices émises ne sont pas adéquates. Les récepteurs somato-sensoriels émettent alors un signal d'erreur qui entraîne une modification de celle-ci avec un délai de correction volontaire de 100 à 120 ms (Johansson et Westling, 1988). À la suite d'un apprentissage, les paramètres internes du modèle central sont modifiés permettant au système musculaire de produire une commande motrice adaptée à la situation et d'éviter un glissement ou d'échapper l'objet. Un tel contrôle anticipé est vraiment avantageux puisqu'il devient possible d'effectuer efficacement et presque systématiquement la tâche.

L'efficacité avec laquelle nous manipulons les objets est liée à la capacité du mécanisme de contrôle à anticiper le changement de certaines variables (Gordon, 1994). Précédemment, il a été démontré que ce mécanisme effectue une coordination anticipée des forces à émettre avant le soulèvement de l'objet. Puis il contrôle dans un second temps, les forces dans l'exécution du mouvement en utilisant le feedback sensoriel.

Finalement, le mécanisme de contrôle anticipé permet une coordination parallèle des forces. Il s'agit d'une augmentation des F_p et F_s avant le déplacement de l'objet. L'information relative au poids de l'objet n'est disponible que lors de son soulèvement. Malgré cela, l'augmentation de ces forces est ajustée en accord avec le poids de l'objet. Johansson et al. (1988) ont étudié l'adaptation des F_p et F_s lors d'une tâche de préhension avec un changement de poids inattendu de l'objet entre les essais. Ces auteurs démontrent que dans les essais avec un changement de poids de l'objet, la programmation des forces s'effectue en fonction du poids de l'objet de l'essai précédent. Par conséquent, un soulèvement d'objet programmé pour un poids inférieur entraîne des forces de pince et de soulèvement insuffisantes pour soulever l'objet. Les sujets utilisent alors une stratégie dite «exploratrice» en ce sens que le sujet doit se reprendre à plusieurs reprises avant de soulever l'objet. Ce type de situation requiert l'utilisation de la vision et des signaux somato-sensoriels afin de modifier la programmation des forces.

Les exemples précédents nous démontrent l'existence du mécanisme de contrôle anticipé, dans des tâches avec un objet expérimental de forme rectangulaire maintenu dans un système qui limite le mouvement dans l'axe vertical uniquement. Récemment,

l'existence de ce mécanisme a été démontré dans le même type de manipulation, mais avec des objets familiers de diverses formes, dimensions et poids (Gordon, Westling, Cole et Johansson, 1993). Ces auteurs ont répété l'étude de Johansson et al. (1988) en utilisant des variations de poids plus importantes. Ces derniers concluent que le mécanisme de contrôle anticipé est parfaitement adapté avec des objets connus et que la représentation en mémoire pour le poids d'un nouvel objet se développe rapidement. Les études utilisant un objet expérimental (Johansson et al., 1984, 1987, 1988) ainsi que celle de Gordon et al. (1993) suggèrent qu'il se produit une modulation parallèle entre la F_p et la F_s dans les tâches où l'on doit soulever et maintenir un objet de manière statique.

Toutefois, lorsque l'on effectue un mouvement dans l'espace avec l'objet, la force de soulèvement résulte d'une combinaison entre la gravité et la force d'inertie proportionnelle à l'accélération de l'objet. Dans cette situation, la force de soulèvement correspond à la tension réelle (Tr). Lors de ce type de situation, de quelle façon les différentes forces sont-elles modulées?

Flanagan, Tresilian et Wing (1993) ont étudié la coordination entre la F_p et la Tr dans des mouvements dirigés dans les axes horizontaux et verticaux ainsi que dans des mouvements d'oscillation. Ces auteurs démontrent que la F_p est modulée en phase avec la Tr dans des mouvements oscillatoires qui impliquent des accélérations importantes de l'objet et dans des mouvements d'un point à l'autre dans l'espace. Cette modulation parallèle représente une forme d'anticipation puisque les changements dans la F_p se produisent au même moment que ceux de la Tr occasionnés par l'accélération.

Parallèlement, Flanagan et Wing (1995) constatent que ce couplage temporel entre la Fp et la Tr se produit aussi lors de mouvements oscillatoires avec des fréquences plus importantes. Une augmentation de la fréquence d'oscillation de 1,43 Hz à 3,13 Hz entraîne une augmentation de la Fp moyenne et une diminution du gain de la Fp par rapport à celui de la Tr, pour l'ensemble du mouvement, à l'intérieur des conditions expérimentales.

Les manipulations d'objet avec des déplacements dans l'espace imposent des exigences plus grandes sur le mécanisme de contrôle anticipé. L'objet soumis à plusieurs accélérations et tensions, contraint le mécanisme à prévoir constamment les différentes forces à émettre afin de s'adapter aux changements. Ces résultats nous permettent donc d'étendre nos connaissances sur le mécanisme de contrôle anticipé ainsi que ses limites d'application. De plus, cette situation expérimentale est intéressante, car plus réaliste. En effet, dans notre quotidien, nous manipulons les objets avec des changements de direction beaucoup plus souvent que nous manipulons ceux-ci dans une position statique.

Problématique

La revue de littérature précédente démontre la capacité du mécanisme de contrôle anticipé à s'adapter aux changements. Pourtant, certains éléments ne sont pas abordés dans l'étude de Flanagan et al. (1995). En effet, la modulation de la Fp présentée dans les études de Flanagan et al. (1993, 1995) semble se maintenir même avec des fréquences d'oscillation relativement élevées. On présume que durant l'exécution de mouvements oscillatoires verticaux du bras à des vitesses lente et moyenne, l'ajustement de la Fp

s'exécute selon un mode contrôle parfaitement adapté et ce, en raison des changements simultanés de la Fp et de la Tr.

Par contre, en modifiant les contraintes de vitesse et de fréquence de façon plus drastique, nous devrions voir apparaître un mode moins bien adapté. Pour ce faire, nous allons demander aux sujets de produire des mouvements d'oscillation à une vitesse maximale. En ajoutant cette nouvelle contrainte, pouvons-nous identifier les limites du système de contrôle? Nous allons ainsi comparer l'évolution des mécanismes d'adaptation dans des tâches dynamiques où la tension exercée par l'objet est modulée par la direction et l'accélération des mouvements verticaux par rapport à celles où l'on modifie le rythme d'augmentation de la charge à l'insu du sujet (condition statique). Cette dernière condition permet de mesurer la capacité d'adaptation des sujets, sans qu'ils puissent faire appel au mécanisme d'anticipation que l'on retrouve lorsque les variations de tension sont modulées par la dynamique du mouvement. Cette comparaison permettra d'étudier le rôle de la programmation dans l'efficacité de l'adaptation de la Fp et de déterminer le seuil où des modifications se produisent dans la stratégie d'adaptation des sujets.

Le but de ce projet de recherche est de quantifier les ajustements de la Fp quand l'augmentation de la Tr se fait dans des conditions dynamique et statique. Nous comparerons les ajustements de la Fp lorsque la tension est induite par une force extérieure appliquée sur l'objet ou lorsqu'elle est émise par le sujet lui-même, donc la tension varie selon la vitesse à laquelle il exécute un mouvement.

Hypothèses

Lors de la condition statique, l'ajustement de la Fp sera toujours réactionnel et devra suivre l'application de la tension. Par conséquent, nous postulons que l'augmentation de la force de pince suivra un profil en escalier en fonction des trois vitesses utilisées.

D'autre part, nous proposons que dans la condition dynamique, l'atteinte de la fréquence d'oscillation maximale entraînera une diminution significative de la modulation de la Fp, telle que suggérée par Flanagan et al. (1995). Précisément, cette stratégie consiste à maintenir une Fp élevée tout en limitant la modulation face aux modifications dans la Tr. De plus, la Fp sera modulée en fonction de l'amplitude des accélérations. À cet effet, il se produira un découplage temporel entre les valeurs maximales de Fp et d'accélération avec l'augmentation de la vitesse d'oscillation.

CHAPITRE II

Méthode

Sujets

Un groupe de dix sujets masculins âgés entre 18 et 30 ans, ont participé à cette étude. Les sujets, recrutés sur une base volontaire, étaient naïfs face au but de l'expérimentation et n'avaient jamais participé à une étude sur la préhension. Les sujets ont signé une feuille de consentement avant le début de l'expérimentation.

Tâche

Le sujet doit saisir un objet, placé sur la table devant lui, et le soulever. Selon la tâche requise, il doit par la suite effectuer des mouvements cycliques verticaux ou bien maintenir l'objet dans une position fixe. Dans la condition statique, un repère externe permet au sujet de maintenir l'objet à une hauteur prédéterminée. Le sujet n'exécute aucun essai de pratique. Chaque sujet est soumis à chacune de ces deux tâches avec une permutation des conditions pour chaque sujet afin d'éviter un effet de séquence.

Appareillage

Enregistrement cinétique. Les données de forces sont enregistrées en utilisant un objet composé d'une partie centrale en phénolique, avec deux plaques de métal sises de part et d'autre sur la partie centrale de celui-ci. L'objet, un bloc de 225 grammes, mesurant 3 cm de largeur par 3 cm de profondeur et 10 cm de hauteur, repose sur une

table. La déformation des plaques de métal est mesurée par des jauges de contrainte montées sur la face antérieure des plaques. Deux morceaux de plexiglass (3 mm d'épaisseur et 9 cm² de surface) collés sur la partie centrale, du côté extérieur des plaques de métal, permettent de limiter le transfert de chaleur des doigts sur les jauges de contraintes (Voir l'encadré de la Figure 1).

Dans la condition statique, l'augmentation de la tension sur l'objet est générée en utilisant un élastique fixé à un engrenage composé de trois roues de dimension différente (3, 7 et 14 cm de diamètre) qui permettent de produire une augmentation de la force de 0 à 4 N en 1, 4 et 8 secondes, respectivement (Figure 1). Une jauge de contrainte, montée en série entre l'objet et ce mécanisme, permet de vérifier l'augmentation de la tension. De plus, les jauges de contraintes sont calibrées au début de chaque séance en utilisant des poids connus. La corrélation obtenue entre les différents poids et les mesures enregistrées par les jauges de contraintes varie de $r=,99$ à 1.

Enregistrement cinématique. Les données cinématiques sont obtenues en utilisant un système d'analyse de mouvement optoélectronique de type WATSMART (Waterloo Spatial Motion Analysis Recording Technique) qui détecte le scintillement de diodes à infrarouge. Les diodes sont collées sur le sujet et l'objet. Les deux premières diodes sont placées sur le bout de l'index et du pouce, la troisième diode est fixée au poignet et finalement, une dernière est fixée sur l'objet afin d'enregistrer son déplacement. Deux caméras, situées à 2 mètres l'une de l'autre et à une hauteur de 2 mètres, recueillent le scintillement des différentes diodes avec une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz. La

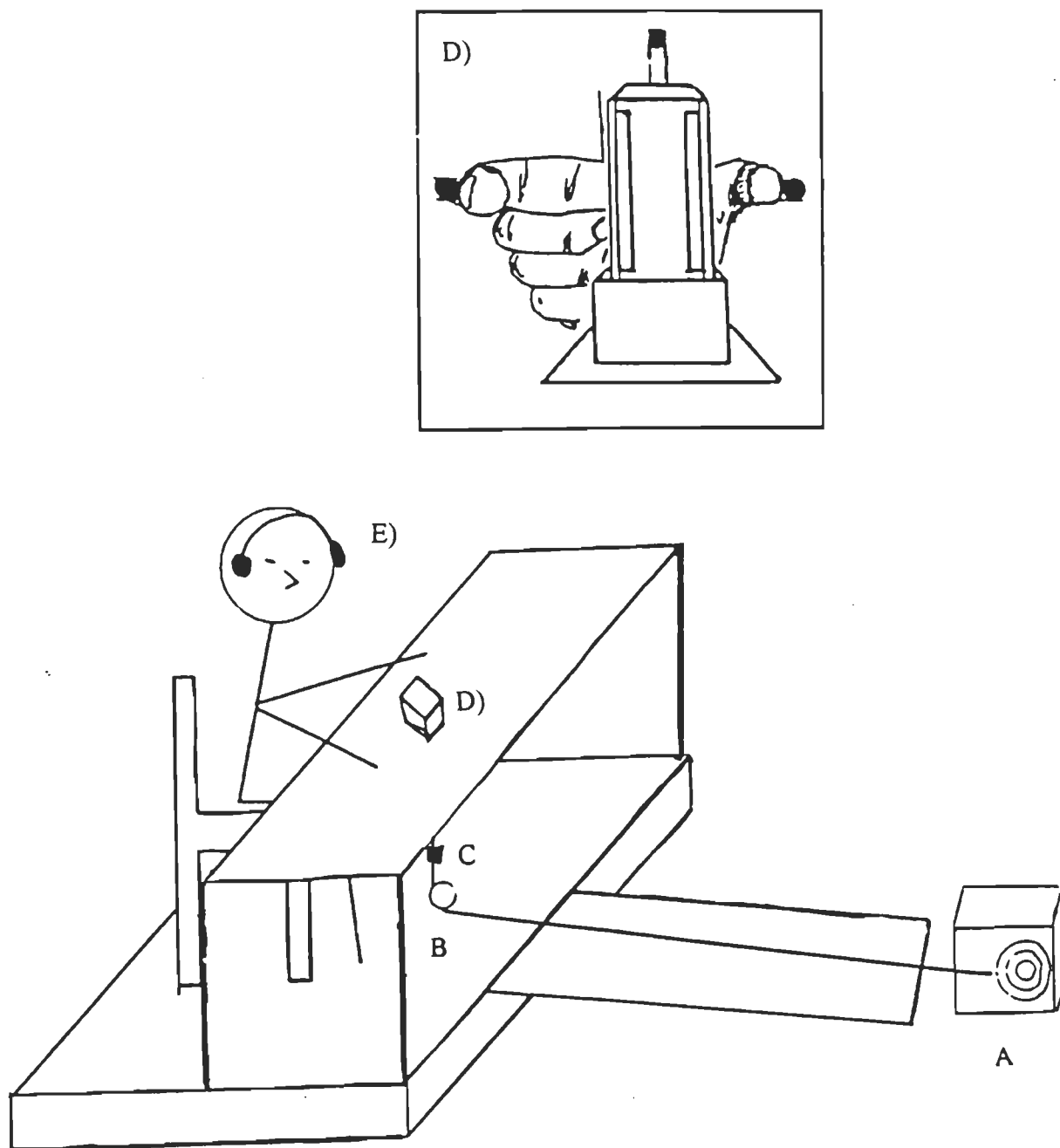


Figure 1. Représentation schématique de l'appareillage: A) Système d'engrenage avec trois roues de dimension différente, B) Poulie, C) Jauge de contrainte mesurant la tension exercée sur l'objet, D) Jauge de contrainte mesurant la force de pince, E) Casque d'écoute.

valeur de calibration obtenue pour les deux caméras avant le début de la période d'expérimentation, est conservée tout au long de l'expérimentation. La valeur de calibration relative à l'erreur de lecture de la position des diodes, dans le champ des caméras est de 1,3 millimètres. Le logiciel WATSMART reconstitue, à partir des coordonnées en deux dimensions des signaux provenant des diodes, une image tridimensionnelle du mouvement. Un ordinateur compatible IBM est utilisé afin de recueillir et analyser les données cinétiques et cinématiques.

Procédures

Déroulement de la séance d'enregistrement.

Au cours de la séance, le sujet est assis face à une table sur laquelle repose l'objet. Dans la condition statique, l'expérimentateur donne les consignes suivantes: «Le but de la tâche est de saisir entre le pouce et l'index de la main droite, l'objet posé sur la table. Tu dois par la suite le soulever à une hauteur de 11 cm, en utilisant le repère visuel suivant, et le maintenir dans cette position pendant 10 secondes.»

Le sujet porte sur la tête un casque d'écoute émettant un bruit blanc. Le début de chaque essai est signalé par la présentation de ce bruit blanc. L'utilisation de ce bruit blanc permet d'éviter que le sujet ne modifie sa Fp en anticipation, en utilisant les bruits du moteur lors de l'enroulement de l'élastique. L'arrêt du bruit blanc signale la fin de l'essai. Entre chaque essai, il y a une pause de 20 à 30 secondes afin de permettre à l'expérimentateur de déplacer le câble sur la roue. Les sujets ne peuvent voir le

mécanisme lors du changement de position du câble. La présentation du bruit blanc signifie le début de l'essai suivant.

Dans la condition dynamique, les sujets reçoivent les consignes suivantes: «Le but de la tâche est de saisir entre le pouce et l'index de la main droite, l'objet posé sur la table. Tu dois par la suite soulever l'objet et effectuer des mouvements cycliques de haut en bas. Il n'y a pas de restriction quant à l'amplitude de ton mouvement. L'expérimentateur t'indique le rythme à suivre avant le début de chaque essai.»

Les sujets doivent accomplir une série de 12 essais dans chacune des conditions expérimentales. Ces essais sont répartis aléatoirement en fonction des trois vitesses d'application (1s, 4s, et 8s) de la tension en condition statique. En condition dynamique, elles sont réparties selon les trois rythmes d'oscillation (lent, moyen et maximal). Chaque essai ne comporte qu'une seule vitesse ou rythme d'oscillation.

Acquisition et analyses des données

Les signaux provenant des différentes jauges de contrainte sont amplifiés adéquatement puis filtrés en utilisant un filtre digital de type Butterworth de second ordre. Pour les données cinématiques, elles sont filtrées adéquatement selon les conditions expérimentales, soit à 6 Hz pour l'oscillation rapide, à 5 Hz pour l'oscillation moyenne, et à 4 Hz pour l'oscillation lente, et la condition statique. Ces fréquences s'avèrent le meilleur compromis pour l'acquisition du signal brut et l'élimination maximale du bruit après une étude pilote effectuée préalablement. Ces données

cinématiques sont par la suite différenciées deux fois pour obtenir les courbes d'accélération.

La deuxième étape de l'analyse consiste à utiliser des valeurs cibles de T_r , pour comparer les différents niveaux de F_p dans la condition statique. Ces valeurs sont égales à 0,3N, 2,49N et 5,6N. En fonction de ces valeurs de T_r , nous déterminons les valeurs correspondantes pour la F_p . Suite à cela, nous recueillons pour chaque essai, quatre échantillons de F_p pour une même valeur de T_r .

La dernière étape consiste à quantifier la réponse initiale de la pince. Pour ce faire, l'amplitude et la durée de cette augmentation seront évaluées en fonction de la vitesse d'application de la tension. Ces variables sont mesurées entre le début et la fin de la période d'augmentation initiale. Le début de cette augmentation est calculée en utilisant comme référence, la valeur moyenne de F_p pour les 250 ms avant le début de l'application de la T_r . La première valeur qui dépasse cette moyenne de deux écart-types est considérée comme le début de la phase d'augmentation. La fin de cette période correspond à la première valeur maximale de la F_p . Pour l'ensemble des sujets ceci correspond à une fenêtre de temps maximale d'environ 600 ms.

Variables et analyses

Pour cette étude, la T_r constitue la variable indépendante pour l'ensemble des conditions expérimentales. Nous pouvons calculer la tension réelle à partir de la formule suivante:

Formule (1) $Tr = \text{masse de l'objet} * (9,8 \text{ m/s}^2 + \text{accélération verticale de l'objet})$.

Lors des conditions moyenne et rapide, l'accélération verticale dans le mouvement vers le bas augmente au-delà de $-g$ ($-9,8 \text{ m/s}^2$). Ce qui a pour conséquence que les sujets exercent une force vers le bas sur l'objet.

Par contre, les variables dépendantes varient selon la condition. On retrouve comme variables dépendantes dans la condition statique, l'amplitude et la durée de la Fp pour les périodes de 0 à 600 ms et de 600 ms à 1,1 s, ainsi que la Fp moyenne pour la période de 1,1 à 10 s. Pour la condition dynamique, les variables dépendantes sont la Fp moyenne, le ratio du gain de Fp/Tr ainsi que de l'écart entre les valeurs maximales de Fp et d'accélération. Enfin lors de l'étude du déplacement de la condition dynamique, les variables dépendantes sont la fréquence d'oscillation, l'amplitude du mouvement et son écart-type.

En ce qui concerne les analyses statistiques réalisées, les variables dépendantes sont soumises à des analyses de variance (ANAVAR). Dans un premier temps, on applique des ANAVAR A X B à la force de pince, le facteur A étant la tension réelle et le facteur B étant la vitesse d'application de la tension. Cette analyse s'effectue pour la condition statique. Par la suite, une seconde série d'ANAVAR est accomplie. Une première ANAVAR unifactorielle consiste à comparer l'amplitude et la durée de l'augmentation de la Fp en fonction de la vitesse d'application de la tension réelle pour les périodes de 0 à 600 ms et de 600 ms à 1,1 s. Une seconde analyse consiste à étudier la fréquence d'oscillation (Hz), l'amplitude des oscillations (cm) et l'écart-type des

amplitudes en fonction des vitesses. Une troisième analyse met en relation le ratio du gain de F_p/Tr et la F_p moyenne en fonction de la vitesse d'application de la tension et du rythme d'oscillation. Enfin une dernière analyse compare la latence entre le maximum de F_p et l'accélération maximale pour chacune des vitesses d'oscillation.

CHAPITRE III

Résultats

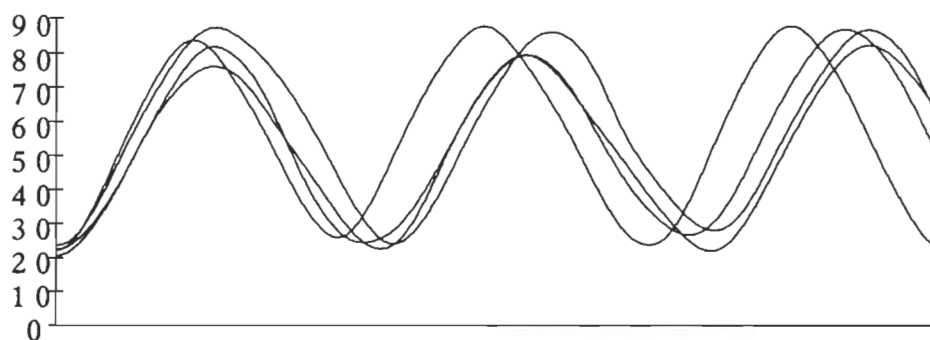
Déplacement vertical de l'objet

L'analyse du déplacement vertical de l'objet permet une description globale de la performance des sujets et une confirmation que les sujets exécutent le mouvement oscillatoire tel que décrit dans les consignes. On considère ainsi les variables de fréquence et d'amplitude pour analyser le contrôle des mouvements oscillatoires des sujets.

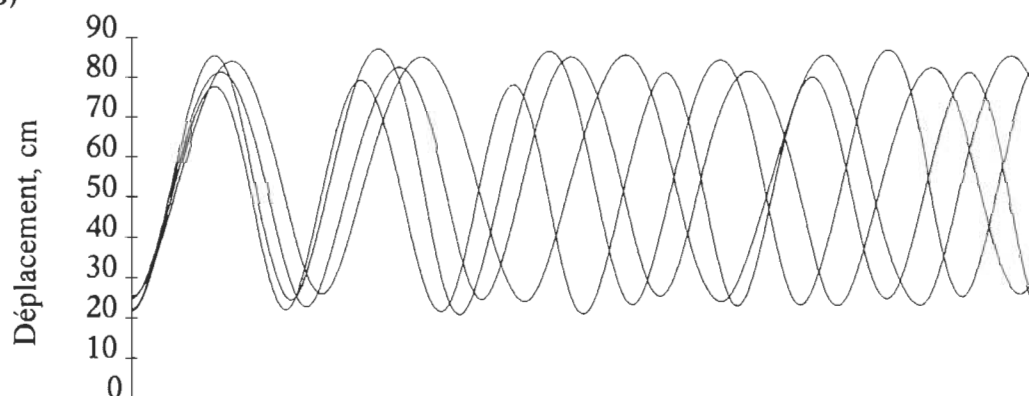
La Figure 2 illustre le déplacement vertical de l'objet pour un sujet en fonction du temps pour les vitesses d'oscillation lente (A), moyenne (B) et rapide (C). Chaque courbe correspond à une portion de cinq secondes, d'un essai. On note pour ce sujet, une faible variabilité de la fréquence et de l'amplitude entre les essais d'un même rythme d'oscillation. Par ailleurs, une des modifications qui se produit avec l'augmentation du rythme d'oscillation est une augmentation marquée de la fréquence du mouvement. Les résultats de l'analyse de variance confirment une augmentation significative de la fréquence ($F_{(8,16)}=40,07, p<0,01$) pour l'ensemble des sujets. On remarque aussi dans cette figure, une diminution de l'amplitude du mouvement. Une ANAVAR révèle une diminution significative de l'amplitude du mouvement ($F_{(8,16)}=32,92, p<0,01$) avec l'augmentation de la vitesse d'oscillation.

L'amplitude d'oscillation en condition lente est de 54,5 cm comparativement à 36,9 cm en condition rapide.

A)



B)



C)

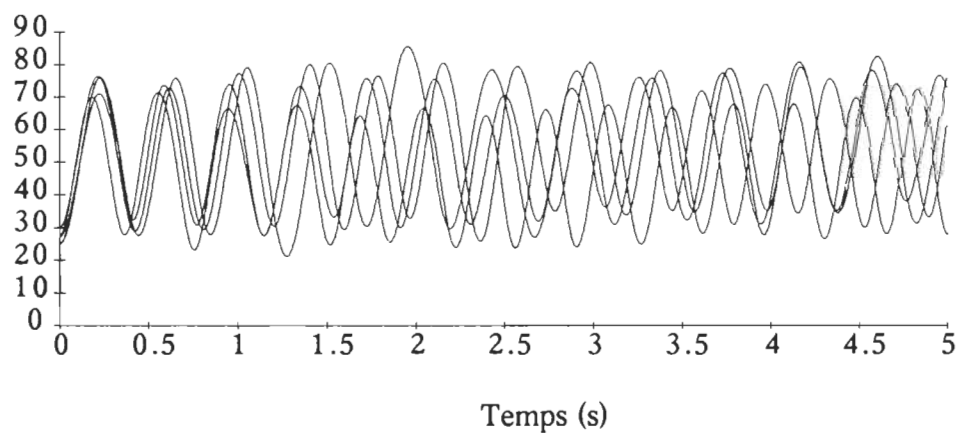


Figure 2. Déplacement vertical de l'objet pour un sujet en fonction du temps pour les vitesses lente (A) moyenne (B) et rapide (C).

Condition statique

Une manipulation efficace de l'objet exige un niveau de Fp supérieur à celui de la Tr. Suite à une première évaluation des données, nous avons identifié des essais où le sujet est capable de maintenir l'objet et ce, en ayant une Fp inférieure à la Tr. Une explication possible de cet illogisme, réside dans la technique utilisée par le sujet pour maintenir l'objet. Nous croyons que ces sujets n'ont pas saisi l'objet au centre des plaques de plexiglass, donc ils n'exercent pas une pression sur la partie centrale des plaques. Donc, la déformation enregistrée par les jauges de contraintes est par conséquent réduite. Ceci implique que pour un niveau de force similaire, la Fp enregistrée est moins élevée que la Fp réelle. La Fp apparaît ainsi inférieure à la Tr. Dans le but de s'assurer de la précision de nos résultats, nous avons éliminé ces essais de la condition statique. En ce sens, 19% des essais, soit 21 essais sur 108 ne sont pas inclus dans l'analyse statistique.

Une première analyse consiste à quantifier le niveau moyen de Fp, pour des tensions de 2 à 6N en fonction des trois vitesses d'application de la tension dans la condition statique. Une ANAVAR ne révèle aucune différence significative de la Fp entre les différents niveaux de tension (0,3N, 2,49, 5,6 N) et de vitesse (1 s, 4 s, 8 s). Une analyse qui ne prend que des points précis de tension ne s'avère donc pas efficace. Ceci provient des nombreuses variations dans la Fp. En effet, celle-ci n'augmente pas nécessairement de façon linéaire selon les essais ou les sujets.

Il est préférable de considérer l'étude de la Fp en fonction des différentes réponses de celle-ci face à l'application de la Tr. Par conséquent, une seconde série d'analyse est réalisée en fonction des trois réponses de la Fp. Une première analyse concerne l'ajustement de la Fp suite à l'application de la Tr. Il a été démontré que lors de l'application de la tension, il se produit une augmentation rapide de la Fp. Cette réponse de la Fp, qualifiée d'augmentation initiale, s'amorce après un bref délai d'environ 80 ms. Cette réponse compense le délai, en augmentant le niveau de Fp de manière à ce qu'il rejoigne celui de la Tr (Johansson et al., 1992, 1994).

Les résultats de l'ANAVAR ne démontrent pas de différences significatives de l'amplitude et de la durée de l'augmentation initiale en fonction de la vitesse d'application de la tension. En effet, la valeur moyenne de l'amplitude est de 14,1 N pour la condition lente, 12,3 N pour la condition moyenne et 15,9 N pour la condition rapide (Figure 3 et Tableau 1). Pour ce qui est de la durée de l'augmentation initiale, elle est de 291 ms pour la condition lente, 267 ms pour la condition moyenne et 277 ms pour la condition rapide. (Figure 3 et Tableau 1)

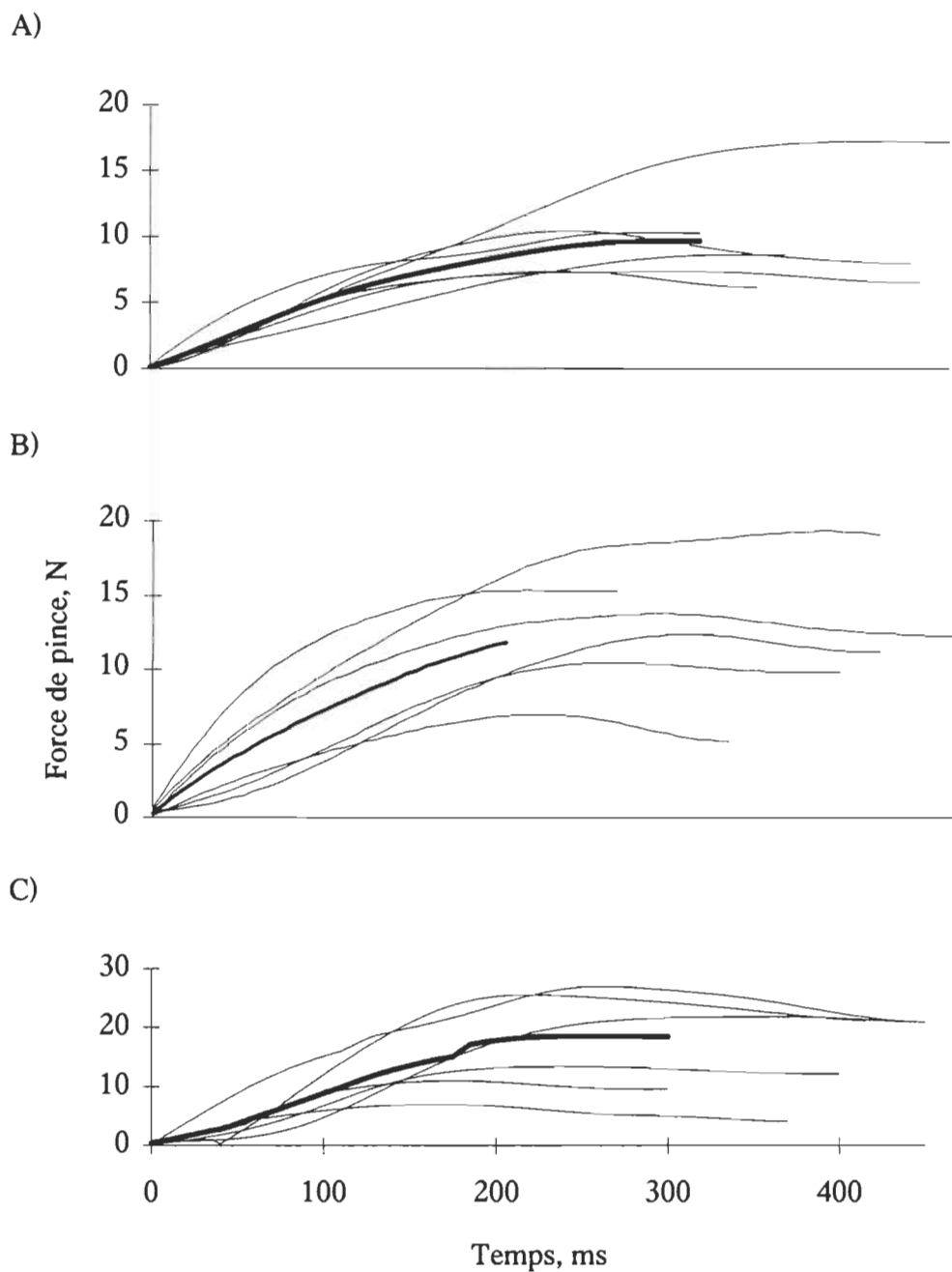


Figure 3. Augmentation initiale de la Fp pour les conditions lente (A), moyenne (B) et rapide (C). Les lignes minces représentent chaque essai et la ligne épaisse représente la moyenne des essais.

Tableau 1

Amplitude et durée de l'augmentation initiale de la Fp en fonction de la vitesse d'application de la Tr (pour la période de 0 à 600 ms).

	Condition	Moyenne	Écart-type	N
Amplitude (N)	Lente	14,1	8,8	16
	Moyenne	12,3	7,1	21
	Rapide	15,9	10,3	23
Durée (ms)	Lente	291	124	16
	Moyenne	267	127	21
	Rapide	277	144	23

Une deuxième analyse examine la Fp suite à cet ajustement initial. Celle-ci démontre une augmentation similaire de la Fp même si la vitesse d'application augmente. En effet, on ne retrouve pas de différence significative de l'amplitude (4,1 N, 3,9 N et 5,1 N) et de la durée (212 ms, 203 ms et 231 ms) de cette réponse en fonction de l'augmentation de la vitesse d'application de la tension (Tableau 2).

Enfin, une dernière analyse permet l'étude de la dernière portion de l'essai, soit de 1,1 à 10 sec. Dans cette partie de l'essai, les différentes vitesses d'application de la Tr, entraînent de grandes variations dans la réponse de la Fp. Ces variations importantes découlent des différents types de modulation de la Fp que les sujets utilisent pour s'adapter aux changements de la Tr.

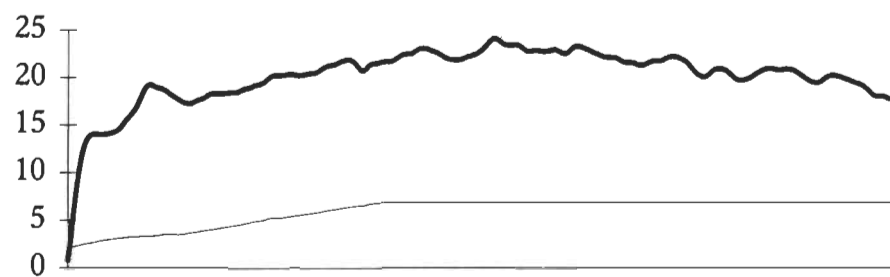
Tableau 2

Amplitude et durée de la Fp pour la période de 600 ms à 1.1 sec en fonction de la vitesse d'application de la Tr.

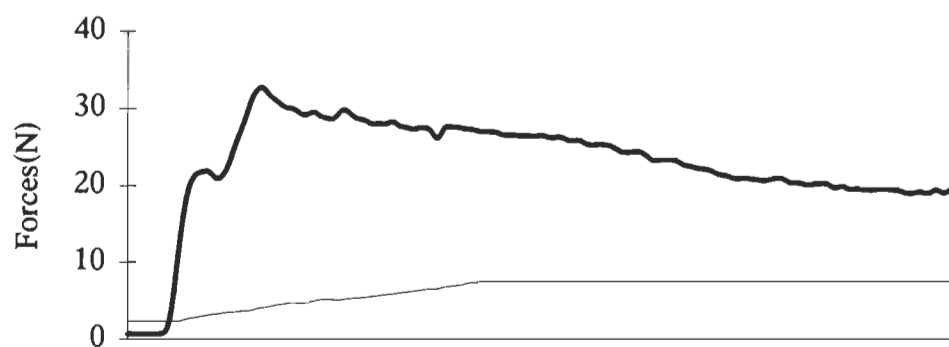
	Condition	Moyenne	Écart-type	N
Amplitude (N)	Lente	4,1	6,8	16
	Moyenne	3,9	4,8	16
	Rapide	5,1	7,4	17
Durée (ms)	Lente	212	157	16
	Moyenne	204	169	16
	Rapide	232	163	17

Lorsque le sujet est soumis à l'application d'une force constante avec une vitesse et un niveau de force imprévisibles, on s'attend à ce qu'il adopte un type de comportement. Le sujet étant incertain face à la tension qui sera émise, applique un niveau de force plus élevé qui permet d'augmenter la marge de sécurité. Ainsi, le sujet est en mesure de maintenir l'objet de façon stable. Ce comportement correspond à une situation de modulation attendue ou idéale. Toutefois, il existe d'autres types de modulation faisant varier la Fp et celles-ci sont présentées à la Figure 4. Généralement lorsque les sujets utilisent un type de modulation, ils le conservent pour la durée d'un essai.

A)



B)



C)

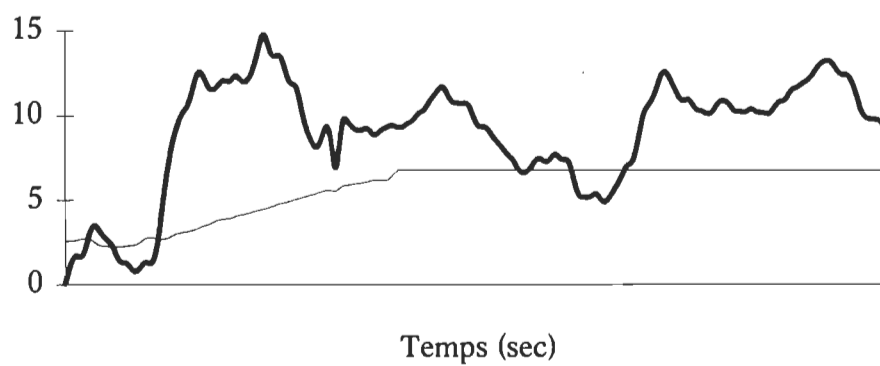


Figure 4. Différents types de modulation de la pince: A) modulation attendue, B) glissements continus, C) glissements. La ligne épaisse représente la Fp et la ligne mince représente la Tr

La figure 4A laisse voir l'exemple d'une modulation attendue de la Fp qui se caractérise par un niveau élevé de Fp tout au long de l'essai. Ce type de modulation se retrouve dans 43,3% des essais de la condition lente, 51,8% de la condition moyenne et 32,1% de la condition rapide. Le Tableau 3 présente le nombre d'essais pour un type de modulation par rapport à l'ensemble des essais effectués pour chacune des vitesses.

Le sujet peut aussi moduler sa Fp en utilisant un glissement continu mais contrôlé (Figure 4B). Cette situation est très différente de la précédente puisqu'il se produit une augmentation initiale de la Fp suivie d'une diminution graduelle de celle-ci. Ce type de modulation se retrouve fréquemment en condition lente, 43,3% des essais par rapport à 32,1% pour les essais dans la condition rapide (Tableau 3).

Tableau 3

Pourcentage des différents types de modulation en fonction de la vitesse d'application de la tension pour les conditions lente, moyenne et rapide.

Conditions	Nombres d'essais*	Glissement	Attendu	Continu
Lente	30	13,4 % (4)	43,3 % (13)	43,3 % (13)
Moyenne	27	22,2% (6)	51,8 % (14)	26,0 % (7)
Rapide	28	35,8 (10)	32,1% (9)	32,1 % (9)

*Ce nombre représente l'ensemble des essais pour tous les sujets.

Le dernier type de modulation est le glissement (Figure 4C). Dans cette situation, le sujet utilise une modulation attendue et occasionnellement, il se produit un glissement, c'est-à-dire que le niveau de Fp devient inférieur à celui requis minimalement pour maintenir l'objet. Le ratio Fp/Tr se rapproche alors de zéro. La durée de ces glissements est d'environ 169 ms (Tableau 4). Il est à noter que la variabilité de la durée de ces glissements est très grande.

Suite à un glissement, la Fp se rétablit assez rapidement (moyenne = 224 ms). Le système de mesure du glissement se définit comme étant l'intervalle entre le moment où le niveau de Fp croise celui de la Tr et celui où la Fp atteint son minimum. L'ajustement de la Fp se définit quand à lui, par l'intervalle entre la Fp minimale et le moment où celle-ci croise à nouveau la courbe de Tr. On ne retrouve pas de différence significative des

Tableau 4

Latence des glissements et de la réponse du réajustement de la Fp en millisecondes.

Conditions	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.	N
Glissement	169	94	35	350	15
Réponse	224	145	49	520	15

latences pour les différentes vitesses d'application de la tension. Par contre le nombre de glissements augmente avec le rythme d'oscillation, soit de 13,4% des essais avec la

condition lente, à 22,2% des essais pour la condition moyenne et 35,8% des essais de la condition rapide (Tableau 3).

Par ailleurs, si on considère l'ensemble des types de modulation, on remarque que l'utilisation ceux-ci se modifient en fonction de l'ordre de présentation des essais (Tableau 5). En effet, lors du premier bloc, les sujets utilisent prioritairement la modulation attendue et le glissement. Par contre, la répétition des essais entraîne une diminution de ces modulations au profit de celle de glissement continu.

Tableau 5

Pourcentage d'utilisation des types de modulation selon l'ordre de présentation des essais.

Type de modulation	Nombre d'essais *	Bloc 1	Bloc 2
Glissement	20	40% (8)	60% (12)
Attendu	36	58% (21)	42% (15)
Continu	29	37% (11)	63% (18)

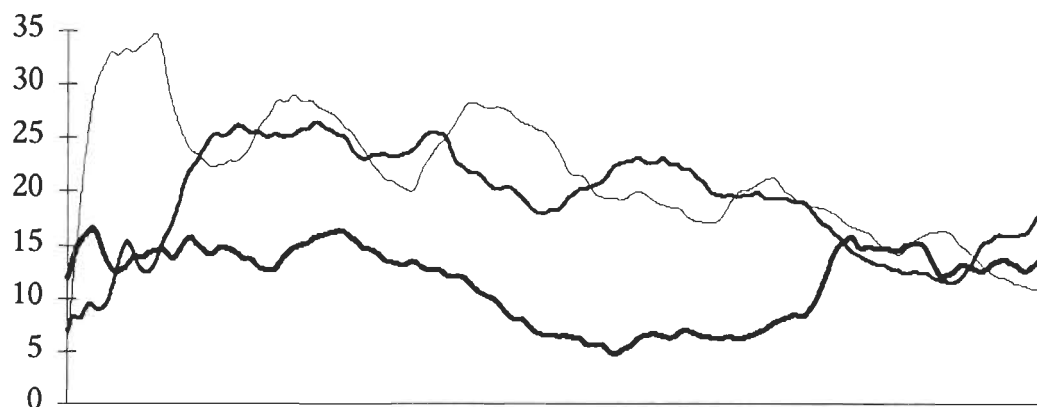
*Les essais proviennent des trois conditions expérimentales. Le bloc 1 correspond aux six premiers essais et le bloc 2 aux six derniers essais.

On s'aperçoit qu'il existe diverses manières de moduler la Fp pour s'adapter à la tension. Malgré les différents types de modulation, nous avons remarqué une évolution constante de la Fp en fonction des conditions. L'analyse de la Fp moyenne permet de quantifier le développement de la Fp pour la durée d'un essai. Nous utilisons la Fp

moyenne calculée pour chacune des vitesses d'application de la tension. La Figure 5 présente la F_p en fonction du temps, sur une période de 10 sec, pour deux sujets. On remarque que le niveau de F_p moyen varie pour les différentes vitesses. Toutefois, l'augmentation de la F_p moyenne à-travers les conditions demeure constante pour l'ensemble des sujets. On dénote également une augmentation significative de la F_p moyenne avec l'augmentation de la vitesse d'application de la tension ($F(2,10)=7,780, p<0,05$). Ce résultat est tout à fait normal compte tenu de l'augmentation de la vitesse d'application de la force et confirme ainsi l'efficacité de la modulation.

A)

Sujet 8



B)

Sujet 9

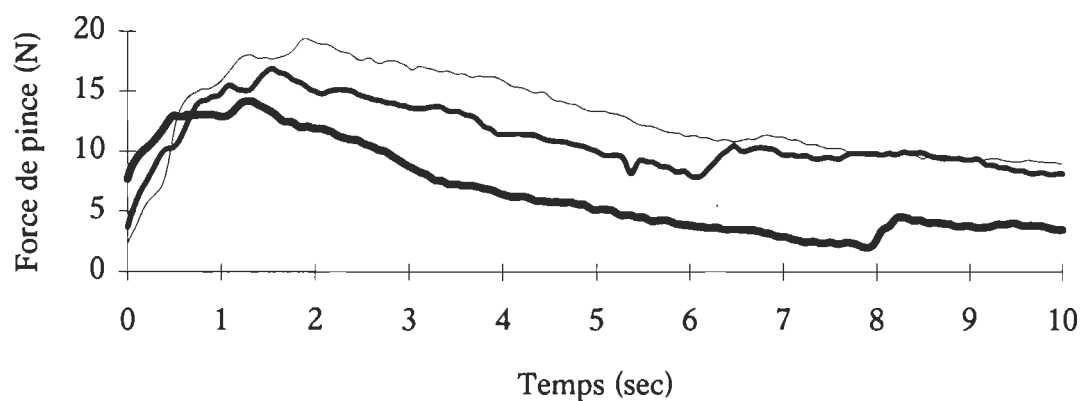


Figure 5. Moyenne de la force de pince de deux sujets pour les vitesses lente, moyenne et rapide. Les lignes mince, épaisse et très épaisse représentent successivement les vitesses rapide, moyenne et lente.

Condition dynamique

Modulation de la Fp en fonction de l'augmentation de la tension réelle

Les travaux de Flanagan et al. (1995) démontrent que l'augmentation de la fréquence d'oscillation de 1,43 Hz à 3,13 Hz entraîne une Fp moyenne plus élevée ainsi qu'une diminution du gain de la Fp par rapport à celui de la Tr à l'intérieur des conditions expérimentales. Ce gain de la Fp par rapport à celui de la Tr exprime la relation entre les valeurs de Fp et Tr à l'intérieur d'un demi-cycle d'oscillation. Dans cette étude, même si la fréquence d'oscillation de la condition rapide est relativement élevée, la modulation se maintient. Par contre, si l'on soumet les sujets à un rythme d'oscillation maximal, ceci occasionne des contraintes plus élevées pour le mécanisme de contrôle. Nous croyons que l'atteinte de la fréquence d'oscillation maximale entraînera une diminution significative de la modulation de la Fp, telle que suggérée par Flanagan et al. (1995). Précisément, cette stratégie consiste à maintenir une Fp élevée tout en limitant la modulation face aux modifications dans la Tr.

Les graphiques de la Figure 6 illustrent un échantillon d'un mouvement oscillatoire du bras, d'un sujet type, d'une durée de deux secondes. La Tr et la Fp sont représentées respectivement par la ligne mince et la ligne épaisse. D'une part, on remarque dans cette figure, une augmentation de la Fp moyenne avec des fréquences d'oscillation plus élevées. Pour l'analyse de la Fp moyenne, on calcule le niveau de Fp moyen pour l'ensemble des essais d'une condition pour chacun des sujets. L'ANAVAR laisse voir une augmentation statistiquement significative de la Fp moyenne avec

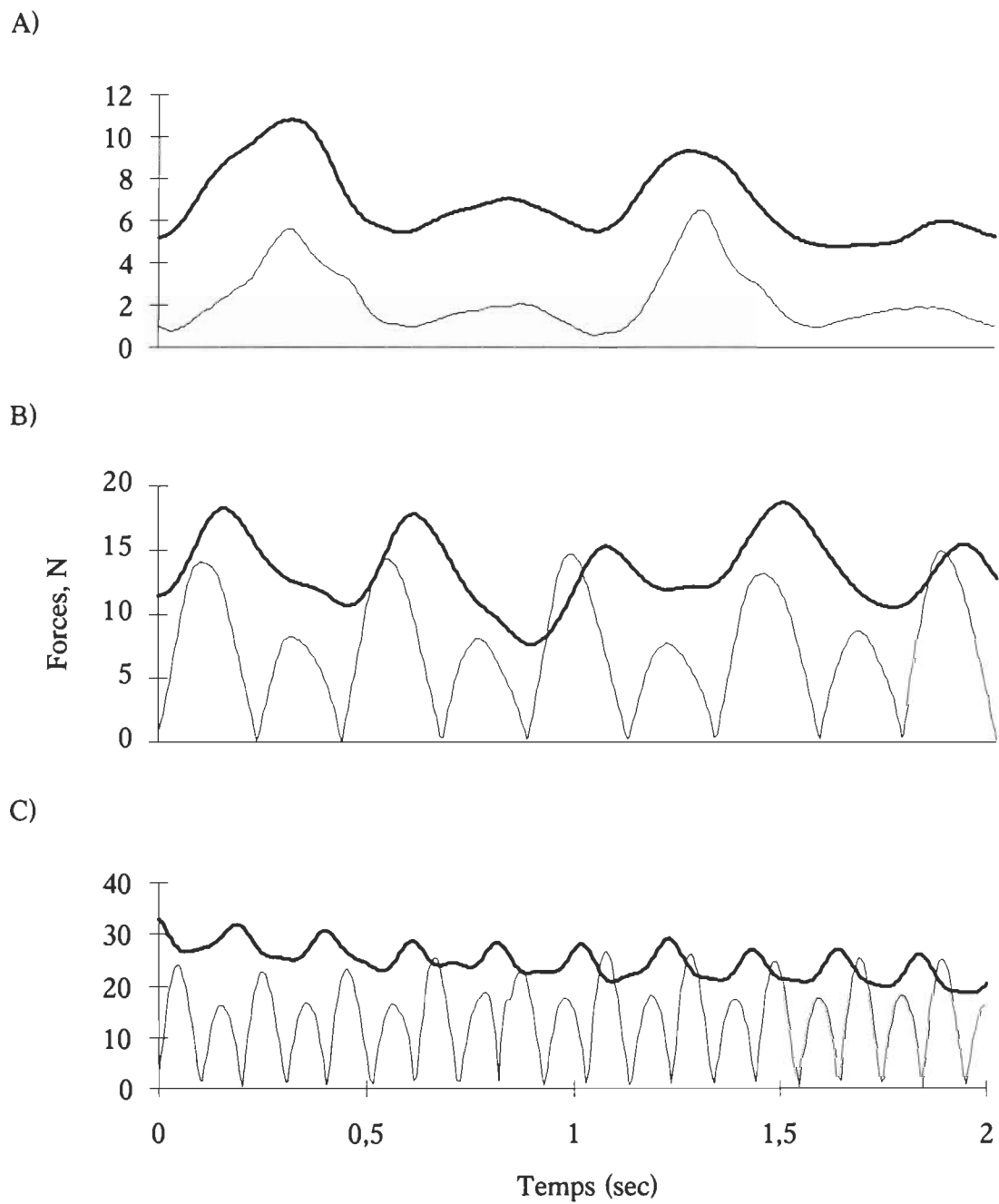


Figure 6. Mouvement oscillatoire d'un sujet type pour les vitesses lente (A) moyenne (B) et rapide (C). La Fp correspond à la ligne épaisse et la Tr correspond à la ligne mince.

l'augmentation de la vitesse d'oscillation pour l'ensemble des sujets ($F_{(24,2)}=35,86$, $p<0,01$) (Figure 7).

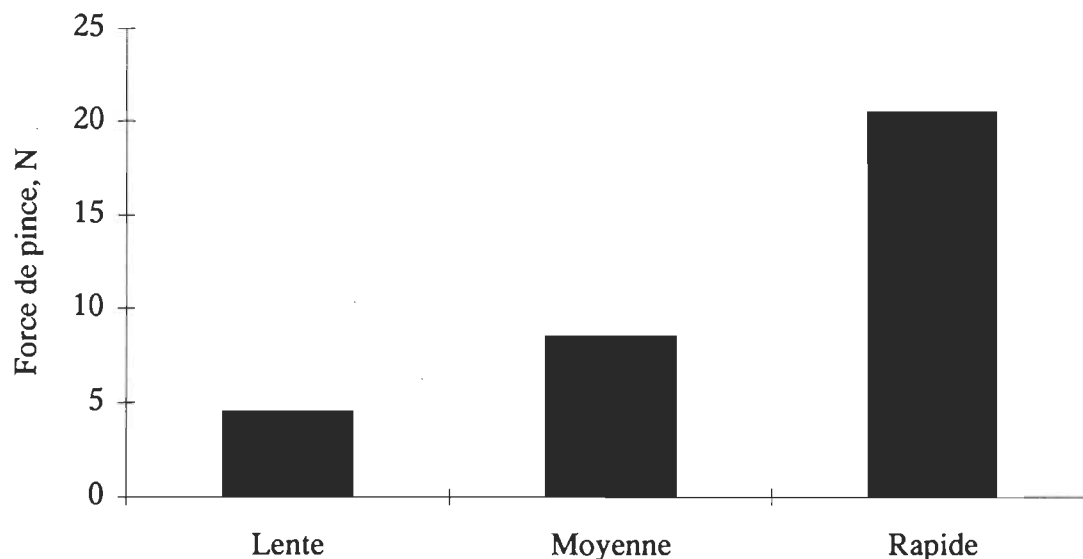


Figure 7. Force de pince moyenne en fonction des fréquences d'oscillation lente, moyenne et rapide.

D'autre part, on constate à la Figure 6, une réduction de la modulation de la Fp et la Tr avec l'augmentation de la fréquence d'oscillation. Afin d'étudier cette diminution de la modulation, nous devons comparer le gain de la Fp par rapport au gain de la Tr pour chacune des vitesses comme l'ont fait Flanagan et al. (1995). Pour ce faire, il nous faut normaliser ces différences entre la Fp et la Tr pour chacune des vitesses afin de comparer sur une base commune, des changements qui ne sont pas équivalents. L'analyse de la modulation des forces s'effectue en utilisant le ratio suivant:

$$\frac{Fp_{\text{maximale}} - Fp_{\text{minimale}}}{Tr_{\text{maximale}} - Tr_{\text{minimale}}}$$

Ce ratio permet de comparer la modulation de la Fp par rapport à la Tr pour les différentes vitesses d'oscillation. Plus ce ratio s'approche de un, plus les niveaux Fp et de Tr déployés sont semblables. Inversement, si ce ratio est près de zéro, il y a une diminution de la modulation de la Fp par rapport à la Tr. Les résultats de la Figure 8 démontrent une diminution significative ($F_{(6, 12)} = 10,15, p < 0,01$) de ce ratio avec l'augmentation de la fréquence d'oscillation, et confirme ainsi la diminution de la relation entre la Fp et la Tr.

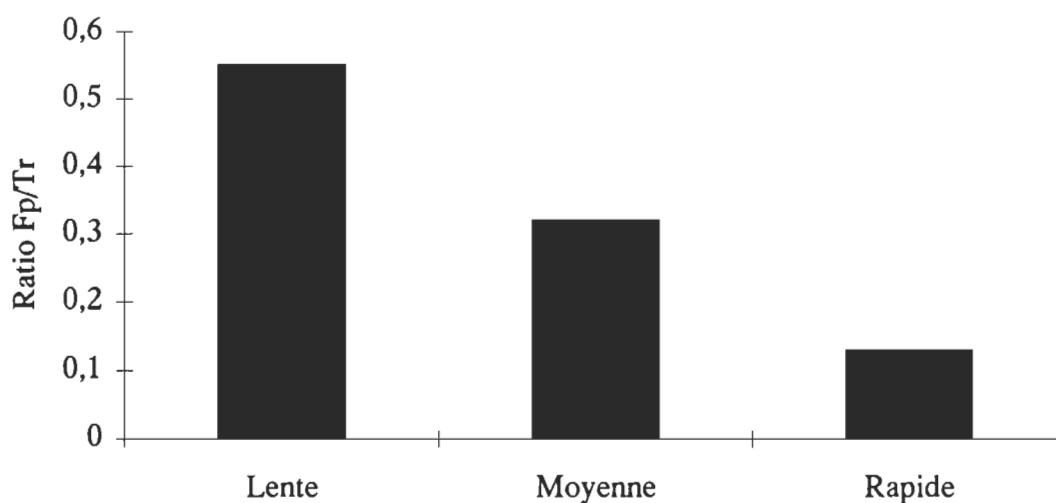


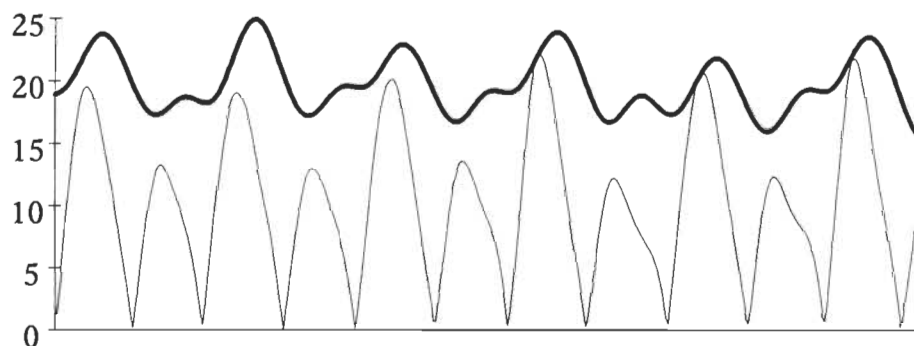
Figure 8. Ratio du gain de Fp/Tr pour les vitesses lente, moyenne et rapide.

L'analyse précédente, effectuée en utilisant une plage de Fp et une fréquence d'oscillation très élevée, corrobore les résultats de Flanagan et al. (1995). Cependant, on observe parallèlement à cette diminution de la modulation Fp/Tr, un ajustement complémentaire de la Fp aux changements de la Tr dans la condition d'oscillation

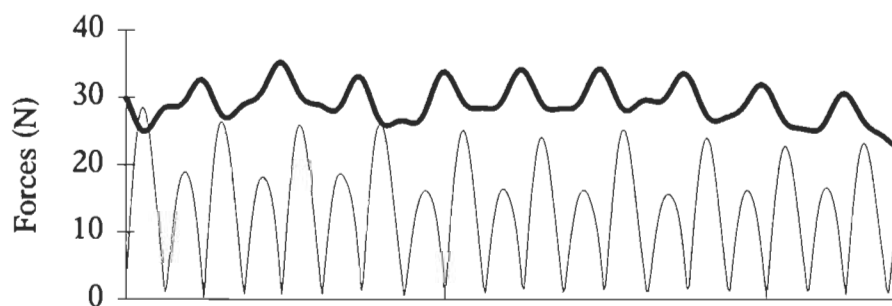
maximale. Flanagan et al. (1995) suggèrent dans leur dernière étude, une hypothèse que la modulation de la Fp serait abolie avec les fréquences d'oscillation très élevées. Toutefois, leurs résultats ne permettent pas de confirmer clairement cette dernière hypothèse. Nous croyons que ceci est liée à la fréquence d'oscillation utilisée dans leur étude. Effectivement, dans leur condition rapide, nous remarquons deux pics dans la Fp et la Tr par cycle (patron semblable à notre Figure 9A). Ces deux maxima correspondent à l'accélération maximale du mouvement vers le haut et vers le bas. Dans notre condition rapide, on voit apparaître une modification de cette relation entre la Fp et la Tr avec des fréquences d'oscillation plus élevées (Figure 9B et C). L'augmentation de la fréquence d'oscillation vers la limite maximale du sujet, entraîne la disparition du deuxième pic correspondant au mouvement vers le bas. Le Tableau 6 illustre le pourcentage des différents types de pics retrouvés en fonction de la vitesse d'oscillation pour des plages d'oscillation de 0,05 cycles/seconde (c/s). Les termes simple et doublet indiquent respectivement un seul et deux pics de Fp par cycle d'oscillation. Le terme transition est utilisé pour les essais ne démontrant pas explicitement un ou deux pics. En effet, il s'agit d'une période où il se produit une réduction du second pic correspondant au mouvement vers le bas, tel que l'on peut voir dans la Figure 9B. On peut remarquer que pour des fréquences lentes allant de 0 à 1,0 c/s, il se produit toujours un doublet de Fp par cycle d'oscillation. À l'opposé, les fréquences très rapides (5,0-5,5 c/s) entraînent un pourcentage élevé de pic simple et aucun doublet. Pour ce faire, l'analyse du gain Fp/Tr, nous avons utilisé les données correspondant à une partie du cycle d'oscillation, soit le

mouvement vers le haut.

A)



B)



C)

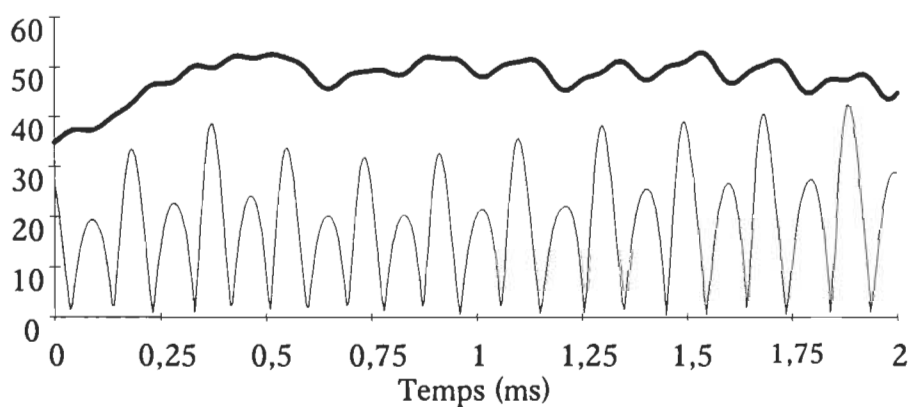


Figure 9. Modulation de la Fp en fonction de la Tr pour différentes fréquences de

la condition rapide; A) 2,82 Hz, B) 4,82 Hz et C) 5,29 Hz. Noter que les échelles de forces sont différentes pour chacun des graphiques.

Tableau 6

Pourcentage des différents types de pic retrouvés en fonction de la vitesse d'oscillation pour des plages d'oscillation de 0,05 c/s.

Fréquence	Simple	Transition	Doublet
0,0 à 0,5 c/s	0 %	0 %	100%
0,5 à 1,0 c/s	0 %	0 %	100%
1,0 à 1,5 c/s	20%	40%	40%
1,5 à 2,0 c/s	0 %	100%	0 %
2,0 à 2,5 c/s	50%	0 %	50%
2,5 à 3,0 c/s	0 %	27%	73%
3,0 à 3,5 c/s	33%	0 %	67%
3,5 à 4,0 c/s	0 %	100%	0 %
4,0 à 4,5 c/s	29%	42%	29%
4,5 à 5,0 c/s	38%	24%	38%
5,0 à 5,5 c/s	67%	33%	0 %

Par conséquent, la diminution de la relation entre la Fp et la Tr ne reflète qu'une partie de l'ajustement de la pince. En réalité, il se produit, une diminution de la réponse de la Fp dans le mouvement d'oscillation. En effet, l'ajustement de la Fp semble s'effectuer par rapport à un cycle d'oscillation plutôt qu'à un demi-cycle, comme nous le constatons dans les vitesses d'oscillations moins élevées. Le sujet préfère ainsi augmenter le niveau général de sa Fp tout en diminuant la modulation face aux changements de la Tr.

Latence entre la force de pince maximale et l'accélération maximale

La section précédente témoigne de l'efficacité du système de contrôle à s'adapter à des modifications rapides et soudaines de la Tr dans une condition dynamique. Selon la fréquence d'oscillation produite par le sujet, l'ajustement de la pince s'exécute différemment. Flanagan et al. (1995) suggèrent que la modulation de la pince est anticipée, car les changements dans la Fp se produisent au même moment que ceux de la Tr occasionnés par l'accélération du mouvement. Cependant, nous croyons que le mode de programmation de la Fp s'effectue différemment en fonction de la fréquence d'oscillation du mouvement.

Dès lors, nous proposons que la modulation de la force de pince en condition dynamique s'effectue en fonction de l'amplitude des accélérations. Par conséquent, nous allons quantifier l'écart entre les valeurs maximales de Fp et d'accélération. La Figure 10 représente un exemple typique de latence entre la Fp et l'accélération avec l'augmentation de la fréquence d'oscillation. La Fp est représentée par la ligne épaisse et l'accélération par la ligne mince. Chacun des graphiques représente un échantillon de deux secondes d'un essai type du même sujet.

Du point de vue théorique, certains résultats de Flanagan et al. (1993,1995) confirment que lors d'un mouvement oscillatoire effectué à basse vitesse, la Fp et l'accélération devraient normalement augmenter de façon parallèle (Figure 10A). Les valeurs maximales de Fp et d'accélération se produisant au même moment. Par contre, en considérant ces résultats, nous croyons qu'une augmentation de la fréquence

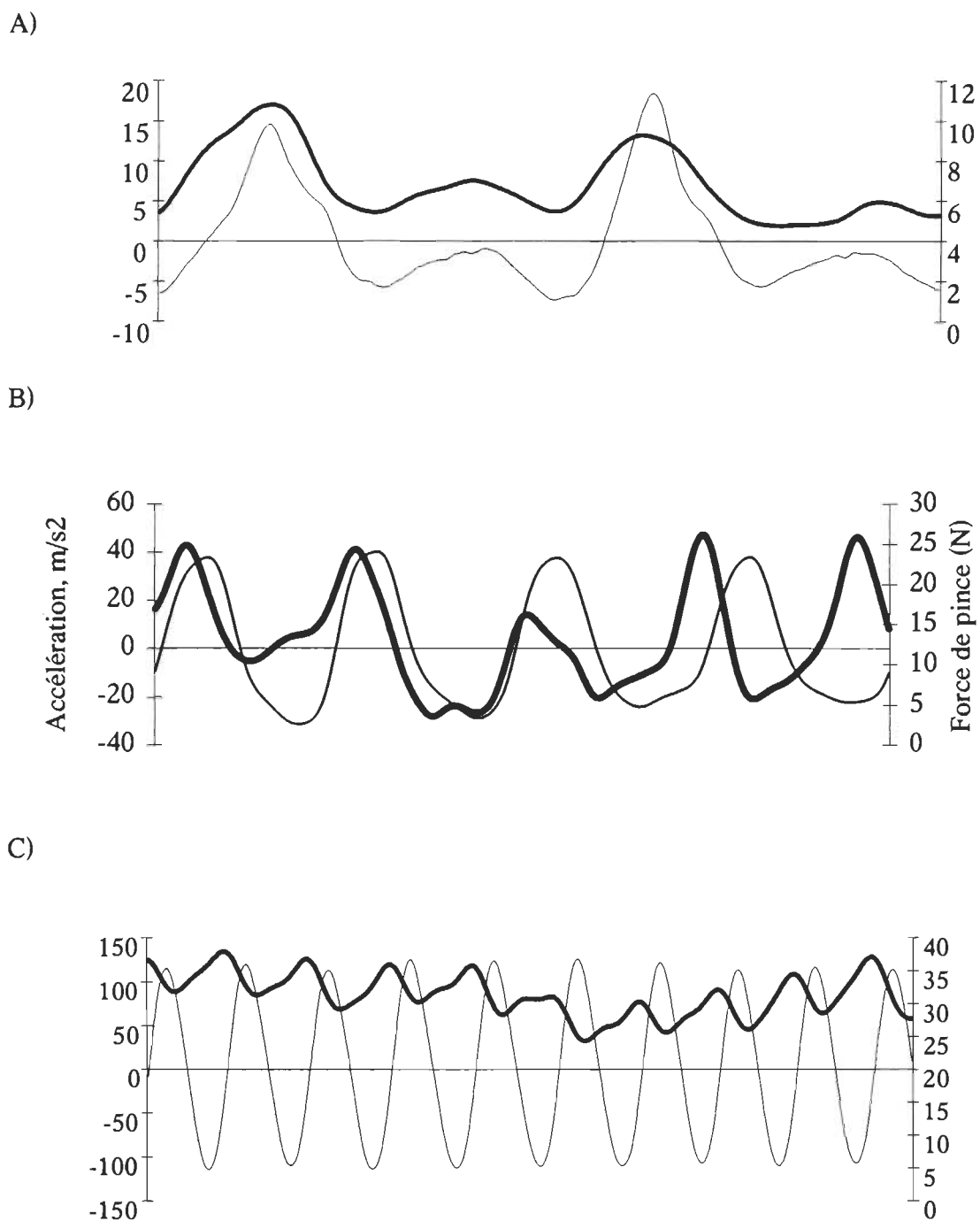


Figure 10. Latence entre la Fp et l'accélération lors d'un mouvement oscillatoire

(A) lent 1Hz, (B) moyen 2 Hz et (C) rapide 5,25 Hz. La Fp correspond à la ligne épaisse et l'accélération correspond à la ligne mince.

d'oscillation, devrait entraîner un découplage temporel entre ces valeurs maximales. La Fp ayant ainsi tendance à se produire avant l'accélération (Figure 10B). Ce découplage devrait s'accroître considérablement à mesure que la fréquence d'oscillation augmente (Figure 10C). Dans cette dernière condition, les valeurs maximales de Fp surviennent nettement avant celles de l'accélération.

L'ANAVAR pour les latences en fonction de la fréquence d'oscillation pour l'ensemble des sujets s'est avérée non-significative. Nous pensons que la modulation dans l'amplitude de la latence évoluerait comme nous l'avions postulé à la Figure 10. En réalité, il se produit un changement dans la direction de la latence avec la vitesse d'oscillation. Selon la vitesse, la latence retrouvée peut être soit positive (maximum de Fp se produit avant accélération) ou négative (maximum de Fp se produit après accélération).

Pour quantifier ces modifications dans la direction, nous calculons le nombre d'échantillons de latences positive et négative pour quatre plages de fréquence d'oscillation. Les valeurs de fréquences utilisées pour constituer les trois premiers groupes proviennent des résultats de Flanagan et al. (1995). On retrouve dans cette étude, pour les vitesses d'oscillation lente, moyenne et rapide des fréquences moyennes de 1,43 Hz, 2,14 Hz et 3,13 Hz. Puis, nous utilisons la plage de fréquence de plus de 3,13 Hz pour désigner le quatrième groupe correspondant à la vitesse d'oscillation maximale. Il est à noter que nous employons la fréquence d'oscillation pour qualifier un échantillon, plutôt que la condition de vitesse dans laquelle il se situe. Et ceci parce que pour une

même fréquence d'oscillation, deux essais peuvent se situer dans deux conditions expérimentales différentes (ex: la fréquence 2,5 Hz peut se situer dans la condition lente pour un sujet et dans la condition moyenne pour un autre). Cette méthode nous permet d'analyser avec plus de précision, les changements de la latence en fonction de la fréquence d'oscillation. La Figure 11 illustre le type de latence retrouvé en fonction des différentes fréquences d'oscillations. Dans cet histogramme, les latences négatives sont représentées en blanc et les latences positives sont représentées en noir. Lors de la condition d'oscillation maximale (3,50 et plus), les sujets semblent présenter une latence positive. À l'opposé dans les fréquences d'oscillation plus lente, il semble que la modulation de la Fp s'effectue avec une latence négative

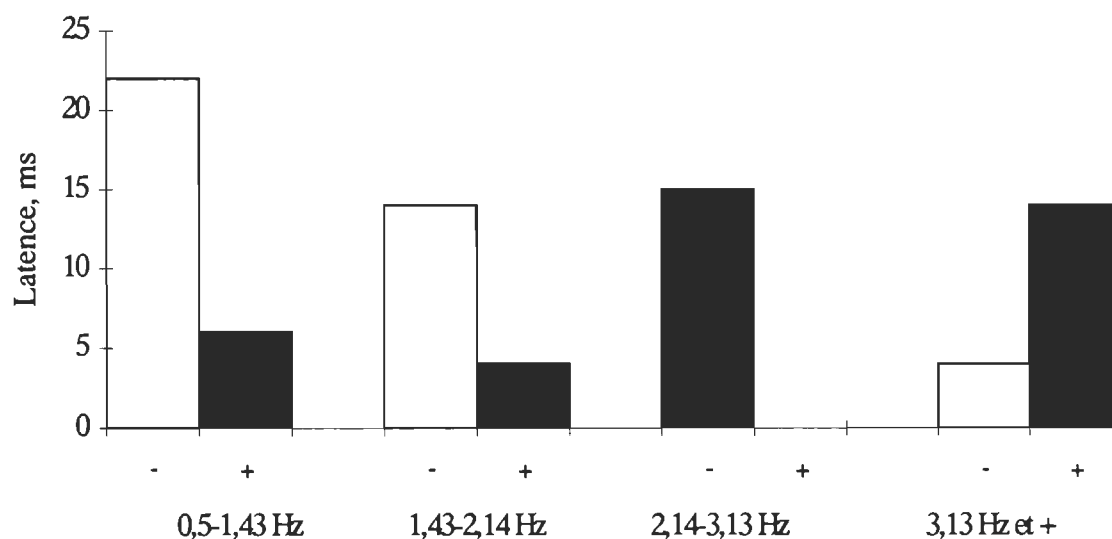


Figure 11. Type de latence retrouvé en fonction des quatre groupes de fréquence d'oscillation.

CHAPITRE IV

Discussion

Déplacement vertical

Les résultats de l'analyse du déplacement vertical démontrent une diminution de l'amplitude du mouvement avec la vitesse d'oscillation. Les sujets réduisent l'amplitude d'oscillation bien qu'aucunes consignes concernant cette variable n'étaient fournies lors de l'expérimentation. Lorsque que l'on effectue un mouvement oscillatoire du bras, les différentes directions dans lesquelles les articulations peuvent se déplacer (degrés de liberté), doivent être coordonnées afin de produire un geste efficace. Selon Bernstein (1967), le problème du contrôle moteur en terme de degrés de liberté consiste à comprendre les principes qui permettent au système moteur de réduire à quelques-unes le nombre de variables à contrôler indépendamment. Une solution à ce problème consiste à limiter le mouvement des articulations par l'utilisation de synergies musculaires flexibles. Cette réduction se réalise en fonction du niveau de contrôle exigé par la tâche.

Steenbergen, Marteniuk et Kalbfleisch (1995) ont étudié la cinématique d'une tâche de préhension et de déplacement d'un objet (en l'occurrence, une tasse de café) dans des conditions impliquant différents niveaux de contrôle. Par exemple, saisir une tasse pleine versus une tasse vide et utiliser la main dominante versus la main non-dominante. Ces auteurs démontrent qu'il se produit une diminution du mouvement angulaire des articulations de l'épaule et du coude, indiquant que les sujets ont réduit le nombre de

degrés de liberté à être contrôlé indépendamment. Dans cette étude, la réduction des degrés de liberté est liée aux objectifs de l'étude. À l'inverse, la réduction des degrés de libertés retrouvée lors de notre déplacement vertical de l'objet, se produit en raison de la contrainte de vitesse qui amène le sujet à réduire l'amplitude de son mouvement, pour augmenter la fréquence d'oscillation et probablement aussi augmenter la rigidité au niveau de la main et du poignet pour ne pas échapper l'objet.

Condition statique

L'application d'une tension inattendue à un objet lors d'une tâche de préhension provoque différentes réponses motrices exécutées de façon séquentielle. Ces réponses induites par l'information sensorielle concernant la tension appliquée à l'objet, permettent d'accomplir la tâche avec une grande efficacité mécanique (Johansson et al., 1992, 1994). Dans notre étude, nous avons analysé les réponses au niveau de la Fp lors de l'application d'une Tr à différentes vitesses.

La première composante de la réponse correspond à une augmentation initiale de la Fp suite à l'application de la Tr. Toutefois, cette augmentation de la Fp ne change pas d'amplitude en fonction de la vitesse d'application de la Tr (Tableau 1). Ce résultat est en contradiction avec ceux obtenus par Johansson et al. (1992). Dans leur étude, ils utilisaient dans une première condition expérimentale, un niveau constant de tension (2N) avec différentes vitesses (2 N/s, 4 N/s et 8 N/s) et dans la deuxième condition expérimentale, différents niveaux de tension (1 N, 4 N et 8 N) appliqués à une vitesse

constante de 4N/s. Leurs résultats démontrent une modulation de l'amplitude de la réponse initiale en fonction de la vitesse d'application et de l'amplitude de la Tr.

Une explication possible de ces différences, provient sûrement de la méthodologie utilisée dans chacune de ces études. Dans l'étude de Johansson et al. (1992), l'objet est maintenu dans un support ce qui réduit presque complètement les mouvements de l'objet dans l'axe antéro-postérieur. À l'opposé dans notre étude, le sujet doit maintenir l'objet dans l'espace et éviter que celui-ci ne glisse ou ne bascule. Une autre explication de cette différence provient du fait que le sujet étant incertain face à la vitesse d'application de la Tr. Donc, pour se prémunir contre toutes les possibilités d'échapper l'objet, les sujets décident d'appliquer un niveau élevé de Fp dans la réponse initiale. Cette augmentation de la Fp est suffisante pour éviter les glissements majeurs et garder le contrôle sur l'objet. En somme, ce niveau élevé de Fp fournit aux sujets une marge de manoeuvre suffisante, pour ajuster leurs réponses ultérieurement. Cette réponse est efficace puisque le sujet n'a presque pas besoin d'augmenter sa Fp dans l'intervalle de temps suivant, soit de 600 ms à 1,1 secondes (Tableau 2).

Suite à cette augmentation initiale et au réajustement, il se produit différents types de modulation qui permettent aux sujets d'ajuster la Fp en fonction de la Tr et de la durée de l'essai. Les types de modulation utilisés se modifient en fonction de l'incertitude face aux changements dans la vitesse d'application de la tension et également en fonction de l'expérience des sujets. Le sujet tente d'exercer un contrôle sur l'ajustement de sa Fp pour

chaque essai en fonction de sa connaissances des résultats et de son appréciation de la réussite de la tâche.

Lors des premiers essais, le sujet utilise une stratégie de modulation attendue en maintenant une Fp élevée. Ceci se traduit par un comportement préventif, ce qui permet au sujet de conserver une marge de sécurité relativement importante pour prévenir les glissements possibles de l'objet. Cette attitude préventive se produit à chaque fois que le sujet est incertain face aux caractéristiques physiques de l'objet (Gordon et al., 1993). Mais également lorsque le sujet est déconcerté par la vitesse ou le niveau de tension, comme dans notre étude. Avec la pratique, les sujet arrivent à déterminer de plus en plus précisément le niveau de tension appliqué. Comme la Fp utilisée lors de l'augmentation initiale est beaucoup trop grande, ceci produit une marge de sécurité qui est non adaptée par rapport aux exigences de la tâche. Le sujet choisit de réduire sa Fp, ce qui se traduit par une diminution de 16 % de l'utilisation de la stratégie de modulation attendue du premier au deuxième bloc. Le sujet utilise alors de façon prioritaire une stratégie de glissements continus (augmentation de 26% du bloc 1 au bloc 2

Par contre, il arrive que le sujet réduise trop son niveau de Fp et dans cette situation il s'approche dangereusement du seuil minimal de Fp pour maintenir le contact avec l'objet. Il se produit alors des microglissements perçus par les mécanorécepteurs de la région en contact avec l'objet. Johansson et al. (1987) démontrent qu'après un délai d'environ 74 ms, la correction est complétée, rétablissant ainsi une marge de sécurité suffisante. Ces microglissements servent de signaux d'alarme et permettent de manipuler

plus efficacement les objets.). Il est à noter que le nombre de glissement demeure stable tout au long de l'expérimentation (premier et deuxième bloc).

Ce type de réponse se rencontre plus particulièrement dans la condition rapide. Dans cette condition, les changements de tension se produisent très rapidement. Donc l'information sensorielle disponible ne correspond plus à l'état du système, lorsque le sujet peut l'utiliser pour modifier sa Fp. Par conséquent, dans cette situation produit le plus haut pourcentage de glissements (55% des essais) et force le sujet à constamment ajuster sa Fp, ce qui produit une augmentation en escalier.

Dans cette dernière situation le sujet est incapable d'anticiper les forces correctement et la qualité de sa performance se détériore significativement.

Condition dynamique

Modulation de la force de pince en fonction de la vitesse d'oscillation

L'augmentation de la fréquence d'oscillation à des valeurs maximales entraîne une modification de l'ajustement de la Fp. Le découplage temporel entre la Fp et l'accélération se produit uniquement avec la fréquence d'oscillation maximale. On constate également que l'augmentation de la vitesse d'oscillation entraîne une réduction de la modulation de la Fp par rapport à la Tr. En effet, le ratio gain de Fp/gain Tr diminue avec l'augmentation de la fréquence d'oscillation (0,45 pour la condition lente, 0,33 moyenne, et 0,15 rapide, Figure 8). Le sujet doit alors augmenter le niveau général de sa Fp, tout en limitant sa modulation face aux changements de la Tr. Ces résultats suggèrent une modification dans le mode de contrôle de la Fp avec l'augmentation de la

fréquence d'oscillation. Dans leurs études, Flanagan et al (1993, 1995) démontrent que l'augmentation de la Fp précède systématiquement le début de l'accélération et proposent que ces ajustements dynamiques sont basés sur un contrôle anticipé (Wing, 1996).

Toutefois, les résultats de notre étude dans la condition dynamique permettent de préciser et de nuancer l'interprétation de Wing (1996). Dans leurs études, Flanagan et Wing obtiennent une fréquence moyenne de 3,13 Hz dans leur condition d'oscillation rapide. Nos résultats suggèrent que cette fréquence n'est pas suffisamment élevée pour démontrer que le maximum de Fp se produit avant le maximum de l'accélération verticale de l'objet (latence positive). Lorsque les sujets effectuent un mouvement oscillatoire avec une fréquence de 3,13 Hz et moins, la valeur de la Fp se produit après celle de l'accélération (Figure 11). Dans ces conditions, nous croyons que les ajustements de la Fp se produisent en utilisant un mode de contrôle en boucle fermée. Le temps de mouvement, pour chaque cycle, étant relativement long ceci permet une intégration adéquate de l'information sensorielle pour s'adapter aux exigences de la tâche (Adams, 1971). Lorsque la fréquence d'oscillation augmente de 3,13 Hz et plus, on retrouve une latence positive entre la Fp et l'accélération de l'objet (Figure 11). Le sujet utilise alors un mécanisme de contrôle anticipé pour ajuster sa Fp.

Flanagan et al. (1995) proposaient que dans les mouvements impliquant des variations importantes de tension, la modulation de la Fp serait réduite. Ainsi, il y aurait un coût associé à cette modulation, et le SNC adopterait une stratégie pour maintenir une Fp élevée tout en limitant la modulation face aux changements de la Tr. Avec

l'augmentation de la vitesse d'exécution à des valeurs maximales, les changements de tension s'effectuent tellement rapidement, que le sujet ne peut plus utiliser l'information sensorielle pour moduler sa Fp. Les données de Chapman (1994) sur le rôle de l'information somatosensorielle lors de tâches de touchers actifs (i.e. lorsque l'on déplace le bout des doigts sur différentes surfaces) viennent renforcer cette hypothèse. Cet auteur a mis en évidence le fait que la transmission de l'information cutanée est diminuée ou contrôlée par un portillon, durant l'exécution de mouvements de toucher actifs.

Donc il est possible que les sujets de notre étude préfèrent augmenter la Fp à une valeur élevée et relativement stable pour diminuer la modulation de façon à ce que la Fp ne réponde qu'aux changements globaux (pour l'ensemble du mouvement) de tension et non aux changements de direction à l'intérieur d'un cycle. Donc, la réduction de la modulation que l'on observe dans les mouvements d'oscillation très élevés peut aussi être le résultat d'un feedback sensoriel diminué. Par ailleurs, le sujet doit émettre une Fp maximale avant celle de l'accélération pour éviter les glissements. Le sujet utilise probablement un mode de contrôle en boucle ouverte, avec un gain très élevé, pour contrôler son mouvement.

CHAPITRE V

Conclusion

Le contrôle de la Fp lors d'une tâche de préhension, se réalise par une interaction entre une programmation centrale (mécanisme de contrôle anticipé) et l'intégration de l'information sensorielle provenant principalement des récepteurs cutanés (Johansson et al, 1992). Selon les exigences de la tâche, le sujet peut davantage utiliser une composante plutôt qu'une autre pour contrôler sa Fp. Nous avons étudié la programmation et l'adaptation de la Fp à l'application d'une tension dans des conditions statique et dynamique.

D'une part dans la condition statique, l'ajustement de la Fp est réactionnel à l'application de la tension. En ce sens, le sujet ne peut utiliser le mécanisme de contrôle anticipé pour programmer sa Fp. Suite à l'application de la tension, le sujet modifie sa pince selon différents types de modulation en utilisant l'information sensorielle des récepteurs cutanés. Cette adaptation de la force de pince s'effectue en fonction de la vitesse d'application de la tension et l'effet de pratique.

D'autre part dans la condition dynamique, l'ajustement de la Fp est accompli en modifiant le mode de programmation de la Fp en fonction de la vitesse d'oscillation. Lorsque la fréquence d'oscillation du mouvement est relativement faible, l'ajustement de la pince s'exécute selon un mode en boucle fermée, puisque le temps de mouvement permet un traitement de l'information sensorielle. Par contre, avec l'augmentation de la vitesse d'exécution, le sujet doit utiliser alors une mode de contrôle en boucle ouverte

(proaction) (Abbs, et al., 1984). Dans ces conditions statique et dynamique, la vitesse d'augmentation de la Tr semble être le facteur occasionnant une modification dans les stratégies d'adaptation des sujets.

L'étude de ces deux conditions introduit de nouveaux éléments concernant le contrôle de la Fp. On remarque tant dans les conditions statique que dynamique, l'efficacité du SNC dans le contrôle de la Fp. Dans la condition statique, malgré une situation où le sujet ne peut anticiper la vitesse d'application de la tension, il se produit un ajustement efficace et contrôlé de la Fp face à l'application de la tension. Ceci se traduit par une augmentation initiale non-adaptée mais suffisante pour prévenir un glissement et par un réajustement de la Fp adapté à la vitesse d'application de la tension. En condition dynamique, la modification dans l'ajustement de la Fp à des conditions d'oscillation maximale démontre la flexibilité du SNC dans la programmation et le contrôle de la Fp.

RÉFÉRENCES

- Abbs, J. H., Gracco, V. L., et Cole, K. J. (1984). Control of multimovement coordination: Sensorimotor mechanisms in speech motor programming, Journal of Motor Behavior, 16, 195-231.
- Adams, J. A. (1968). Response feedback and learning. Psychological Bulletin, 70, 486-504.
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. Journal of Motor Behavior, 3, 111-149.
- Bernstein, N. (1967). The coordination and regulation of movements. London: Pergamon.
- Cole, K. J., et Johansson, R. S. (1993). Friction at the digit-object interface scales the sensorimotor transformation for grip responses to pulling loads. Experimental Brain Research, 95, 523-532.
- Flanagan, R. J., et Tresilian, J. R. (1994). Grip-load force coupling: a general control strategy for transporting objects. Journal of Experimental Psychology, 20, 944-957.
- Flanagan, R. J., Tresilian, J. L., et Wing, A. M. (1993). Coupling of grip force and load force during arm movement with grasped objects. Neuroscience Letters, 152, 53-56.
- Flanagan, R. J., et Wing, A. M. (1993). Modulation of grip force with load force during point-to-point arm movements. Experimental Brain Research, 95, 131-143.
- Flanagan, R. J., et Wing, A.M. (1995). The stability of precision grip forces during arm movements with a hand-held load. Experimental Brain Research, 105, 455-464.
- Gordon, A. M. (1994). Development of the reach to grasp movement. In K. M. B. Bennett et U. Castiello, New Perspectives of the Reach to Grasp Movement. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Gordon, A. M., Westling, W., Cole, K. J., et Johansson, R. S. (1993). Memory representation underlying motor commands used during manipulation of common and novel objects. Journal of Neurophysiology, 69, 1789-1795.

- Johansson, R. S., et Cole, K. J. (1994). Grasp stability during manipulative actions. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 72, 511-523.
- Johansson, R. S., Hager, C., et Riso, R., (1992). Somatosensory control of precision grip during unpredictable pulling loads: Changes in load force rate. Experimental Brain Research, 89, 181-191.
- Johansson, R. S., Riso, R., Hager, C., et Backstrom, L. (1992). Somatosensory control of precision grip during unpredictable pulling loads: I. Changes in load force amplitude Experimental Brain Research, 89, 181-191.
- Johansson, R. S., et Westling, G. (1984). Role of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. Experimental Brain Research, 56, 550-564.
- Johansson, R. S., et Westling, G. (1987). Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip. Experimental Brain Research, 66, 141-154.
- Johansson, R. S., et Westling, G. (1988). Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting tasks with precision grip. Experimental Brain Research, 71, 59-71.
- Lashley, K. S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. Journal of Physiology, 43, 169-194.
- Mackenzie, C. et Iberall, T. (1994). The grasping hand. Amsterdam: North-Holland.
- Proteau, L., Lassonde, M., et Chicoine, A. (1992). Developmental aspects of sensorimotor integration. Developmental Neuropsychology, 8, 381-394.
- Rosenbaum, D. A. (1991). Human motor control. San Diego, CA: Academic Press.
- Smith, A. M. (1994). Some shear forces and pure friction related to roughness discrimination and cutaneous control of grasping. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 72, 583-590.
- Steenbergen, B., Marteniuk, R. G., et Kalbfleish, E. (1995). Achieving coordination in prehension: joint freezing and postural contributions. Journal of Motor Behavior, 27, 333-348.

- Westling, G., et Johansson, R. S. (1987). Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans. Experimental Brain Research, 66, 128-140.
- Wing, A. M. (1996). Anticipatory control of grip force in rapid arm movement. In A.M. Wing, P. Haggard et R. Flanagan. Hand and Brain: Neurophysiology and psychology of hand movement. San Diego: Academic Press.